

CONTENIDO

3872

Preámbulo para el estudiante

XIII

Símbolos y abreviaturas

XXII

1 PRINCIPIOS, CONCEPTOS BASICOS Y DEFINICIONES 1

1.1 Introducción 1.2 Sustancia operante o de trabajo 1.3 El sistema 1.4 Superficie y volumen de control 1.5 Propiedades y estado 1.6 Sistemas de unidades 1.7 Unidades SI 1.8 Aceleración 1.9 Masa 1.10 Peso 1.11 Volumen específico y densidad 1.12 Peso específico 1.13 Presión — Teoría cinética 1.14 Presión en un fluido 1.15 Manómetros de líquido 1.16 Principio de Arquímedes 1.17 Temperatura — Punto de vista microscópico 1.18 Escalas de temperatura 1.19 Medición de la temperatura 1.20 Ley cero 1.21 Procesos y ciclos 1.22 Conservación de la masa 1.23 Depósito térmico 1.24 Máquinas térmicas 1.25 Superficie y proceso adiabáticos 1.26 Conclusión.

2 CONCEPTOS DE ENERGIA 29

2.1 Introducción 2.2 Relación entre masa y energía 2.3 Medición de la energía 2.4 Energía potencial gravitacional 2.5 Energía cinética 2.6 Energía interna 2.7 Trabajo 2.8 Trabajo sobre la frontera móvil de un sistema 2.9 El trabajo depende de la trayectoria 2.10 Ejemplo — Trabajo en un proceso sin flujo 2.11 Trabajo de elasticidad 2.12 Tensión superficial 2.13 Trabajo eléctrico 2.14 Ejemplo 2.15 Ecuación generalizada del trabajo 2.16 Energía de flujo 2.17 Calor — Punto de vista microscópico 2.18 Calor específico a volumen constante 2.19 Calor específico a presión constante 2.20 Relación de calores específicos 2.21 Calores específicos de un gas ideal 2.22 Aspectos microscópicos del calor específico 2.23 Variación de los calores específicos 2.24 Calores específicos medios 2.25 Otras formas de energía 2.26 Conservación de la energía 2.27 Movimiento perpetuo de primera clase 2.28 Conclusión.

3 LA SUSTANCIA PURA 61

3.1 Introducción 3.2 Postulado del estado 3.3 Fases 3.4 Cambios de fase a presión constante 3.5 Comparación de las curvas de líquido y vapor 3.6 Superficies termodinámicas

cas 3.7 Diagramas de fases 3.8 Regla de las fases 3.9 Ecuaciones de estado 3.10 Tablas de gas 3.11 Tablas de líquido y vapor 3.12 Líquido comprimido 3.13 Ejemplo — Comparación de los cambios de entalpía del agua durante la compresión 3.14 Diagramas de propiedades 3.15 Diagrama de Mollier 3.16 Diagrama p - h 3.17 Conclusión.

4 PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA - ENERGIA 80

4.1 Introducción 4.2 Primera ley de la termodinámica 4.3 Energía interna — Consecuencia de la primera ley 4.4 Relación entre E y U 4.5 Entalpía (o entalpía) 4.6 Sistemas cerrados 4.7 Ecuaciones de energía para sistemas cerrados 4.8 Sistemas abiertos y flujo constante 4.9 Ecuación general de energía para el sistema abierto 4.10 Sistemas abiertos con estado estacionario y flujo constante 4.11 Aplicaciones de la ecuación de flujo constante 4.12 Relaciones entre propiedades a partir de ecuaciones de energía 4.13 Sistemas abiertos con estado no estacionario y flujo transitorio 4.14 Materia que atraviesa más de dos fronteras 4.15 Fronteras del sistema 4.16 Ejemplo — Compresor de aire 4.17 Energía de fricción o rozamiento 4.18 Ecuación de energía para el movimiento de fluidos incompresibles 4.19 Movimiento de un fluido incompresible a través de un ventilador o una bomba 4.20 Conclusión.

5 SEGUNDA LEY DE LA TERMODINAMICA - ENTROPIA 107

5.1 Introducción 5.2 Enunciados de la segunda ley de la termodinámica 5.3 Desigualdad de Clausius 5.4 Concepto de entropía con base en la segunda ley 5.5 Producción de entropía 5.6 Ejemplo — Producción de entropía dentro de un sistema 5.7 Disponibilidad en un sistema cerrado 5.8 Disponibilidad en un sistema de flujo constante 5.9 Reversibilidad 5.10 Irreversibilidad 5.11 Irreversibilidad en un sistema cerrado 5.12 Irreversibilidad en un sistema de flujo constante 5.13 Porción disponible del calor 5.14 Ejemplo — Irreversibilidad de un proceso adiabático 5.15 Ejemplo — Irreversibilidad de un cambio de calor con un sumidero (o antifuerza) 5.16 Ejemplo — Irreversibilidad debida a un cambio de calor 5.17 Observaciones generales acerca de la entropía; la disponibilidad y la irreversibilidad 5.18 Calor y entropía en un proceso irreversible 5.19 Cambio de entropía en un sistema abierto 5.20 Ejemplo — Pérdidas mecánicas 5.21 Ejemplo — Irreversibilidad del flujo o corriente en un tubo 5.22 Ejemplo — Producción de entropía en el caso de un cambio transitorio 5.23 Análisis por la segunda ley 5.24 Funciones de Helmholtz y de Gibbs 5.25 Equilibrio 5.26 Consideración cuantitativa del equilibrio 5.27 La segunda ley y la probabilidad 5.28 Movimiento perpetuo de segunda clase 5.29 El sumidero de calor 5.30 Conclusión.

6 EL GAS IDEAL 147

6.1 Introducción 6.2 Ley de Boyle (o de Mariotte) 6.3 Ley de Charles (o de Gay-Lussac) 6.4 Ley de Avogadro 6.5 Ecuación de estado 6.6 Constante de un gas 6.7 Ley de Joule 6.8 Calores específicos de un gas ideal 6.9 Ejemplo 6.10 Ley de Dalton de las presiones parciales 6.11 Experimento de Joule-Thomson 6.12 Tercera ley de la termodinámica 6.13 Entropía de un gas ideal 6.14 Ejemplo — Mezcla irreversible de gases 6.15 Tablas de gases 6.16 Ejemplo — Propiedades en la tabla de gas 6.17 Conclusión.

7 PROCESOS EN LOS FLUIDOS

167

7.1 Introducción 7.2 Proceso isométrico 7.3 Ejemplo — Proceso isométrico (reversible) 7.4 Proceso isométrico irreversible 7.5 Proceso isobárico 7.6 Ejemplo — Proceso isobárico en un gas ideal 7.7 Ejemplo — Proceso isobárico en un vapor 7.8 Ejemplo — Proceso isobárico irreversible 7.9 Flujo constante con $\Delta K = 0$, $\Delta P = 0$, $W = 0$ 7.10 Ejemplo — Flujo constante y estado estacionario 7.11 Proceso isotérmico 7.12 Ejemplo — Proceso isotérmico en aire 7.13 Proceso isentrópico 7.14 Ejemplo — Proceso isentrópico 7.15 Ejemplo — Proceso isentrópico con calores específicos variables 7.16 Procesos adiabáticos, reversibles e irreversibles 7.17 Ejemplo — Procesos adiabáticos, reversibles e irreversibles 7.18 Ejemplo — Proceso adiabático irreversible 7.19 Calorímetro de vapor (o vaporímetro) de estrangulación 7.20 Proceso politrópico 7.21 Ejemplo — Proceso politrópico, soluciones con k constante y mediante la tabla de gas 7.22 Gráficas para diferentes valores de n 7.23 Propiedades en la estagnación (o detención de un fluido) y el número de Mach 7.24 Ejemplo — Propiedades en la estagnación 7.25 Flujo de salida de un tanque rígido 7.26 Ejemplo — Gas saliente de un tanque 7.27 Cambio de entropía en un volumen de control, sustancia pura en un proceso transitorio 7.28 Ejemplo — Entropía, flujo no constante 7.29 Ejemplo — Flujo transitorio 7.30 Ejemplo — Flujo transitorio 7.31 Eficiencias y relaciones características 7.32 Conclusión.

8 CICLOS EN LOS GASES

211

8.1 Introducción 8.2 Fluido expansible en una máquina térmica 8.3 Trabajo de ciclo, eficiencia térmica (o termodinámica) y consumo de calor 8.4 Ciclo de Carnot 8.5 Temperatura termodinámica 8.6 Ciclo de Carnot para un gas ideal 8.7 Trabajo de ciclo determinado por $\oint p \, dV$, o bien, $-\oint V \, dp$ 8.8 Presión media efectiva 8.9 Ejemplo — Ciclo de Carnot 8.10 Regeneración 8.11 Ciclo de Stirling 8.12 Ciclo de Ericsson 8.13 Ciclo inverso y ciclo reversible 8.14 Ciclo de Carnot inverso 8.15 Ejemplo — Análisis de un ciclo 8.16 La máquina reversible más eficiente 8.17 Conclusión.

9 POTENCIA EN SISTEMAS BIFASICOS

234

9.1 Introducción 9.2 Ciclo y máquina ideales 9.3 Ciclo y máquina de Rankine 9.4 Eficiencias de Rankine en el caso de consumos de vapor 9.5 Ejemplo — Máquina de Rankine 9.6 Mejoramiento de la eficiencia térmica de un motor Rankine 9.7 Regeneración 9.8 Ciclo regenerativo 9.9 Máquina de ciclo regenerativo 9.10 Recalentamiento 9.11 Ciclo y máquina regenerativos y con recalentamiento 9.12 Calentadores de agua de alimentación (o regeneradores) de tipo cerrado 9.13 Ciclos de vapor binarios 9.14 Ciclo y motor de expansión incompleta 9.15 Conclusión.

10 GASES REALES

262

10.1 Introducción 10.2 Ecuaciones de estado 10.3 Ecuación de van der Waals 10.4 Uso de una ecuación de estado para determinar cambios en propiedades y en la energía 10.5 Coordenadas reducidas y factor de compresibilidad 10.6 Diagrama de compresibilidad generalizado 10.7 Ejemplo — Dado el volumen 10.8 Ecuación de estado generalizada 10.9 Ejemplo 10.10 Desviación de la entalpía 10.11 Desviación de la entropía 10.12 Ejemplo — Proceso isotérmico 10.13 Ejemplo — Proceso de estrangulación 10.14 Ejemplo

— Proceso isentrópico 10.15 La fugacidad y el diagrama de coeficiente de fugacidad generalizado 10.16 Ejemplo — Proceso isotérmico 10.17 Conclusión.

11 RELACIONES DE PROPIEDADES TERMODINAMICAS 283

11.1 Introducción 11.2 Relaciones matemáticas básicas 11.3 Relaciones de Maxwell 11.4 Ejemplo — Cambio de entropía, $T = C$, determinado por la ecuación de estado 11.5 Ecuación de Clausius-Clapeyron 11.6 Ejemplo — Ecuación de Clapeyron 11.7 Coeficientes de dilatación y compresibilidades; módulos volumétricos 11.8 Ejemplo — Variación de la energía interna con la presión 11.9 Ejemplo — Trabajo isotérmico y calor en el caso de un sólido 11.10 Ecuación de estado para un gas ideal y los coeficientes respectivos 11.11 Ecuaciones generales para determinar el cambio de entropía 11.12 Desviación de la entropía 11.13 Desviación de la entropía evaluada por estados correspondientes 11.14 Ejemplo — Entropía del agua comprimida 11.15 Cambio de entropía con el volumen, $T = C$ 11.16 Ecuación general para el cambio de energía interna 11.17 Ecuación general para el cambio de entalpía 11.18 Desviación de la entalpía 11.19 Coeficiente de Joule-Thomson 11.20 Calores específicos 11.21 Ejemplo — Diferencia de calores específicos en el caso de un sólido 11.22 Ecuaciones de energía en el caso de líquidos o sólidos 11.23 Calores específicos de los sólidos 11.24 Superficie de Gibbs primitiva 11.25 Superficie de Gibbs derivada 11.26 Relaciones termodinámicas a partir de la superficie de Gibbs primitiva 11.27 Mezclas de gases no ideales 11.28 Sistema elástico 11.29 Sistema paramagnético 11.30 Celda electroquímica reversible 11.31 Conclusión.

12 MEZCLAS DE GASES Y VAPORES 325

12.1 Introducción 12.2 Descripción de las mezclas 12.3 Ejemplo 12.4 Propiedades de una mezcla 12.5 Mezclas de gases con una sustancia que experimenta cambio de fase 12.6 Punto de rocío (o de saturación) 12.7 Humedad relativa 12.8 Humedad específica (o relación de humedad) 12.9 Proceso de saturación adiabática 12.10 Temperatura de bulbo húmedo (o psicrométrica) 12.11 Diagrama psicrométrico 12.12 Entalpía y entropía de vapor sobrecalentado a baja presión 12.13 Ejemplo 12.14 Ejemplo — Propiedades del aire atmosférico 12.15 Entalpía, energía interna y entalpía psicrométrica de una mezcla de gas y vapor 12.16 Ejemplo 12.17 Mezclas distintas de la de aire y vapor de agua 12.18 Ejemplo — Mezcla de aire y combustible 12.19 Ejemplo — Proceso de acondicionamiento del aire 12.20 Ejemplo — Proceso isométrico 12.21 Mezcla de corrientes 12.22 Conclusión.

13 SISTEMAS REACTIVOS 351

13.1 Introducción 13.2 Combustibles 13.3 Análisis de los combustibles 13.4 Composición del aire 13.5 Relaciones de aire a combustible 13.6 Ejemplo — Combustión del octano 13.7 Ejemplo — Volumen de los productos de combustión 13.8 Combustión con exceso y con deficiencia de aire 13.9 Ejemplo — Punto de rocío del H_2O 13.10 Ejemplo — Determinación del aire necesario y de los productos de combustión, a partir del análisis gravimétrico del combustible 13.11 Análisis de los productos de combustión 13.12 Ejemplo — Relación real de aire a combustible 13.13 Ejemplo — Aire para la combustión de un hidrocarburo de composición desconocida 13.14 Calores de reacción (poder calorífico) 13.15 Entalpía de combustión 13.16 Observaciones acerca de los poderes caloríficos 13.17 Cambio de entalpía durante la reacción 13.18 Proceso de combustión, estados aleatorios

13.19 Entalpia sensible del octano líquido 13.20 Ejemplo — Temperatura después de la combustión en un motor Diesel ideal 13.21 Ejemplo — Disponibilidad e irreversibilidad en el caso de la combustión 13.22 Ejemplo — Reacción en una pila eléctrica de combustible 13.23 Combustión a volumen constante 13.24 Relación de los poderes caloríficos a presión y a volumen constantes 13.25 Ejemplo 13.26 Ejemplo — Cálculo de poderes caloríficos a volumen constante 13.27 Poder calorífico a una temperatura distinta de la estándar 13.28 Ejemplo — Entalpia de reacción a una temperatura de 0°R 13.29 Entalpia de formación 13.30 Ejemplo — Temperatura al final de la combustión en un motor Diesel 13.31 Entalpia de formación determinada con base en el poder calorífico 13.32 Poder calorífico determinado a partir de la entalpia de formación 13.33 Función de formación de Gibbs 13.34 Reacciones reversibles 13.35 Condición para el equilibrio químico en gases ideales 13.36 Ejemplo — Disociación del CO_2 13.37 Ejemplo — Efecto de la presión sobre la disociación del CO_2 13.38 Ejemplo — Disociación del H_2O 13.39 Recipiente de equilibrio de Van't Hoff 13.40 Constante de equilibrio 13.41 Ejemplo — Constante de equilibrio determinada a partir de ΔG , 13.42 Ejemplo — Temperatura de combustión adiabática con disociación 13.43 Fugacidad y actividad 13.44 Potencial químico 13.45 Conclusión.

14 COMPRESORES DE GAS

400

14.1 Introducción 14.2 Tipos de compresores 14.3 Trabajo de compresión 14.4 Curvas de compresión preferibles 14.5 Aire libre 14.6 Eficiencia volumétrica 14.7 Cilindrada y desplazamiento volumétrico 14.8 Eficiencia de la compresión 14.9 Ejemplo — Compresor de aire 14.10 Ejemplo — Estado final y cambio de entropía determinados a partir de la eficiencia 14.11 Otras eficiencias (o rendimientos) 14.12 Compresión múltiple (o en pasos sucesivos) 14.13 Transmisión de calor en un enfriador intermedio 14.14 Ejemplo — Compresor de dos pasos 14.15 Velocidades del pistón o émbolo 14.16 Conclusión.

15 TURBINAS DE GAS Y MOTORES DE REACCION

422

15.1 Introducción 15.2 Ciclo de Brayton con flujo constante 15.3 Temperatura intermedia para obtener trabajo máximo 15.4 Turbina de gas con fricción de fluido 15.5 Ejemplo — Turbina de gas con rozamiento y sin él; estándar de aire 15.6 Balance de energía en el caso de un combuster 15.7 Ejemplo — Combustor (o cámara de combustión) 15.8 Ciclo ideal con regeneración o calentamiento regenerativo 15.9 Eficacia de un regenerador 15.10 Otras variantes del ciclo de Brayton 15.11 Propulsión reactiva o de reacción 15.12 Trabajo determinado mediante el principio de impulso y cantidad de movimiento 15.13 Potencia máxima 15.14 Efectos de compresión dinámica o de estagnación 15.15 Ejemplo — Efectos de estagnación 15.16 Parámetros de funcionamiento en motores de reacción 15.17 Estatorreactores 15.18 Cohetes 15.19 Conclusión.

16 MOTORES DE COMBUSTION INTERNA

458

16.1 Introducción 16.2 Ciclo de Otto 16.3 Estándares de comparación ideales 16.4 Ciclo de Otto con estándar de aire 16.5 Consideraciones de la energía en el ciclo Otto abierto 16.6 Ejemplo — Determinación del tamaño de un motor 16.7 Ciclo de Diesel 16.8 Ciclo Diesel abierto ideal 16.9 Ejemplo — Ciclo de Diesel 16.10 Análisis por la segunda ley 16.11 Ciclo de combustión dual 16.12 Variantes en los motores reales 16.13 Conclusión.

17 CICLOS INVERSOS

476

17.1 Introducción 17.2 Ciclo de Carnot inverso 17.3 Conclusiones del ciclo de Carnot 17.4 Unidad para la capacidad frigorífica o de refrigeración 17.5 Ejemplo — Máquina frigorífica de Carnot 17.6 Refrigeración por compresión de un vapor 17.7 Desplazamiento volumétrico del compresor 17.8 Ejemplo 17.9 Refrigerantes 17.10 Refrigeración por vacío 17.11 Ejemplo — Refrigeración por vacío 17.12 Sistemas de refrigeración por absorción 17.13 Ciclo frigorífico con un gas 17.14 Variantes de los ciclos básicos de refrigeración 17.15 Criogenia 17.16 Sistema Linde de licuefacción 17.17 Sistema Claude de licuefacción 17.18 Trabajo mínimo para la licuefacción de gases 17.19 Compresión múltiple 17.20 Separación de mezclas binarias 17.21 Conclusión.

18 TOBERAS, DIFUSORES Y MEDIDORES DE FLUJO 507

18.1 Introducción 18.2 Principios básicos 18.3 Velocidad acústica 18.4 Ejemplo — Velocidad acústica 18.5 Flujo isentrópico en un conducto de sección variable 18.6 Intensidad de flujo en una tobera 18.7 Relación crítica de presión 18.8 Corrección de la velocidad inicial 18.9 Eficiencia y coeficientes de funcionamiento de una tobera 18.10 Ejemplo — Diseño básico de una tobera. Variación de la velocidad, el volumen específico y la sección transversal en el caso de un gas ideal 18.11 Ejemplo — Flujo en condiciones de equilibrio en una tobera de vapor 18.12 Flujo en condiciones de sobresaturación 18.13 Ejemplo — Flujo en sobresaturación 18.14 Flujo en toberas con relaciones de presión variables 18.15 Difusor 18.16 Ejemplo — Difusor 18.17 Ecuaciones aproximadas en el caso de un cambio pequeño de presión — Tubo de Venturi 18.19 Ejemplo — Medidor de Venturi (o venturímetro) 18.20 Medidores de flujo de los tipos de tobera, orificio y tubo de Pitot 18.21 Conclusión.

19 TRANSFERENCIA (O TRANSMISION) DE CALOR 535

19.1 Introducción 19.2 Conducción térmica 19.3 Ley de Fourier 19.4 Ejemplo — Densidad de flujo de calor 19.5 Variación de la conductividad térmica 19.6 Conducción a través de una pared plana 19.7 Coeficiente superficial de transmisión 19.8 Transmisión de calor de un fluido a otro 19.9 Ejemplo — Transmisión a través de una pared plana compuesta 19.10 Conducción a través de una pared curva (cilíndrica) 19.11 Ejemplo 19.12 Diferencia media logarítmica de temperatura 19.13 Ejemplo — DML de temperatura 19.14 Radiación térmica 19.15 Ley de Stefan-Boltzmann 19.16 Algunas definiciones básicas 19.17 Factor de configuración 19.18 Radiación entre cuerpos grises 19.19 Ejemplo — Dos superficies grises en el espacio 19.20 Ejemplo — Radiación en una tubería de vapor 19.21 Radiación en los gases 19.22 Repaso de las unidades 19.23 Viscosidad 19.24 Viscosidad cinemática 19.25 Análisis dimensional y números adimensionales 19.26 Movimiento de un fluido (flujo o corriente) 19.27 Convección de calor 19.28 Coeficiente superficial de transmisión 19.29 Coeficiente superficial en el caso de flujo turbulento en un tubo 19.30 Ejemplo — Precalentador de aire 19.31 Ejemplo — Coeficiente superficial en el caso del vapor de agua 19.32 Coeficiente superficial en el caso de flujo laminar de líquidos en tubos 19.33 Ejemplo — Calentador de aceite con vapor 19.34 Coeficientes superficiales en el caso de flujo a través de un conducto anular 19.35 Flujo por fuera de un tubo en convección forzada 19.36 Coeficientes superficiales en el caso de convección libre 19.37 Ejemplo — Pérdida de calor en un tubo 19.38 Condensación de vapores 19.39 Conclusión.

Obras de consulta

583

Apéndice A

591

Eficiencias y características de funcionamiento — Máquinas de movimiento alternativo

Apéndice B

603

Propiedades termodinámicas de las sustancias

Índice analítico

655